高精度超导重力观测与研究为国家精密测绘和全球地球动力学提供理论基础

孙和平[1,2]　周江存[1]　徐建桥[1]　陈晓东[1]　雷湘鄂[1]　崔小明[1]　牛晓伟[3]

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 大地测量与地球动力学国家重点实验室 武汉 430077

2 中国科学院大学 北京 100049

3 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 武汉大地测量国家野外科学观测研究站 武汉 430077

摘要　1985年以来，武汉大地测量国家野外科学观测研究站积累了近35年的高精度重力观测数据；通过广泛的国际合作，建立了亚洲地区唯一的国际重力固体潮基准，建立了台站低频背景噪声模型；构建了全球重力固体潮实验模型和中国大陆精密潮汐改正模型，改善了地表质量负荷重力效应的理论模拟；探测了液态地球的近周日共振、地球自由振荡和地球内核平动振荡等与地球动力学相关的信号，并应用于研究地球深内部物性参数；提出了耦合温度场的球形分层地球的形变理论等。相关研究成果可为国家精密测绘、全球大尺度地球动力学和空间技术提供新的理论指导和背景材料。

关键词　固体潮，超导重力仪，地球动力学，物质迁移，变形理论

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20210202002

地球重力场的时间变化综合反映了来自其他天体的引潮力变化和地球系统内不同圈层质量迁移情况。而这些质量在空间分布的调整又与地球自转、地表负荷、地震甚至地球内核运动等地球动力学现象密切相关。地球是由地表流体层、地壳、地幔、液态外核和固态内核等组成的分层旋转椭球体，在不同圈层内部和各圈层之间耦合的动力学过程中会产生多种自由运动简正模。它们是与地球深内部结构物性参数和内部动力学等地球科学基础研究领域的前沿热点问题密切相关的，并且会在地表及外部空间的重力场变化中得

资助项目：国家自然科学基金重点项目（40730316），中国科学院知识创新工程重要方向性项目（KZCX2-YW-133），国家重点基础研究发展计划（2014CB845902），国家自然科学基金创新研究群体项目（41021003、41321063、41621091），中国科学院战略性先导科技专项（B类）（XDB41000000）

修改稿收到日期：2021年2月1日

以体现。因此，对重力场的时间变化特征的分析与研究有助于加深我们对地球各圈层内部活动及各圈层之间的耦合等现象的认识。

目前，观测精度达到 10^{-8} m/s^2（微伽）的重力仪就属于高精度重力仪的范畴。而超导重力仪的精度要比微伽标准高 1—2 个量级，具有超高的观测精度、极低的漂移率、非常高的稳定性和灵敏度[1]。仪器主要部件封装在绝缘的充满液氦的杜瓦瓶内，一个超导小球悬浮在磁场中，磁力正好精确地平衡重力。对上部和下部线圈的电流的比例进行调整，可以使磁力梯度（等同于弹簧常数）非常微弱。因此，非常小的重力变化，会引起超导球大的移动，从而具有非常高的灵敏度。零电阻的超导性能，允许产生磁场的电流可以稳恒流动，只要保持在临界温度的超导状态下，就永远没有电阻带来的损耗，因此具有极强的稳定性。采用磁悬浮测试感应体，从根本上解决了机械弹簧重力仪的零漂问题。因此，超导重力仪是目前性能最好的相对重力仪，是研究重力固体潮及重力长期变化最理想的观测仪器，能有效检测地球表面和内部物质迁移，以及深内部动力学效应。

武汉大地测量国家野外科学观测研究站（以下简称“武汉大地测量站”）超导重力观测始于 1985 年，其超导重力仪在 1997 年经过了仪器厂家的升级更新。后来与比利时、英国和德国等国的重力仪进行了长期的同址比对观测，建立了武汉国际重力潮汐基准，对早期建立的基准值进行了校正，确定了更为精密的潮汐模型，为空间和地面大地测量以及地球物理观测提供精密的潮汐改正，它也是亚洲唯一的国际重力潮汐基准[2]。为研究青藏高原地下结构及隆升等区域构造动力学现象，武汉大地测量站在与武汉基本处于同一纬度区的云南丽江和西藏拉萨分别安装了新型超导重力仪，三地构成一条超导重力长期连续观测的东西链条，为相关研究提供了重要的数据保障[3]。

在对超导重力观测资料的长期分析与研究过程中，也促进了相关理论的发展。得益于全球地球动力学计划（GGP）的实施，基于全球超导重力仪观测资料共享，台站科研人员开展了重力固体潮、大气负荷和海潮与陆地水负荷、地球自由核章动、地球自由振荡、内核平动振荡等全球动力学信号的研究与检测；同时，还开展了地下水重力效应的理论模拟研究。

1 建立了武汉大地测量站的背景噪声模型

台站背景噪声水平是评价观测数据质量和台站观测环境优良水平的一个关键指标。武汉大地测量站分频段（如地震、亚地震、潮汐频段）定量研究了超导重力仪台站的背景噪声水平，发现在低频部分超导重力仪比传统地震仪的背景噪声水平要低，同时也证实了超导台站具有较低的噪声水平、较高的观测质量[4]。定量评估了“中国大陆构造环境监测网络”30 个 gPhone 连续重力台站背景噪声水平，探讨了背景噪声的地域分布特征，初步建立了中国大陆重力场背景噪声模型[5]。

2 构建了精密潮汐改正模型

武汉大地测量站利用全球长期连续超导重力观测资料，获得了精密的重力潮汐因子和相位滞后，构建了全球固体潮实验模型。通过对比实验模型与实测结果，发现该实验模型中 O_1、K_1、M_2 和 S_2 4 个主要潮波的差异平均优于 0.2%[6]。该实验模型接近于非弹性、非流体静压力平衡初始状态的地球模型的结果。其中，周日潮波部分与 Mathews[7]的结果比较一致，而半日波部分与 Dehant 等[8]的结果更加一致。

利用不同的理论固体潮模型和上述的实验固体潮模型，结合由 NAO99b 全球海潮模型和中国近海海潮模型，基于格林函数方法计算的海潮负荷效应，构建了中国大陆精密重力潮汐改正模型。结果表明，采

用不同的固体潮模型或实验模型会对重力潮汐结果产生相对变化幅度小于0.06%的差异；在沿海地区，海潮负荷的影响约为整个潮汐的4%，而中部地区约为1%；其中，中国近海潮汐模型的影响约占整个海潮负荷的10%，内插或外推潮波的负荷约占海潮负荷的3%。通过与超导重力观测资料进行比较表明，重力潮汐改正模型的精度远远优于 5×10^{-9} m/s^2，这说明构建的改正模型具有很好的实用性，可为中国大陆高精度重力测量提供精密的改正模型[9]。

3 改善了地表质量负荷重力效应的理论模拟

武汉大地测量站利用标准大气模型构造了大气重力格林函数，克服了传统的计算大气负荷效应时模型复杂、计算量大的缺点，获得了精度较高的大气负荷效应。根据大气重力信号随区域分布而变化的特征，计算了大气重力导纳值[10]。基于弹性地球表面负荷理论，利用准三维大气模型，建立了一套大气负荷效应的计算系统。采用地表气压和温度资料计算了大气负荷效应和大气重力导纳值，为快速计算大气负荷效应奠定了基础[11]。

采用由高空间分辨率的数字高程模型确定的海陆边界来模拟沿海和岛屿的海潮负荷效应，构建了我国沿海和岛屿的重力潮汐模型[12]。显示了考虑高精度海陆边界信息在计算沿海和岛屿海潮负荷的重要性，同时也指出准确的高程值在计算沿海重力海潮负荷中的重要性。

利用全球20个台站高精度重力潮汐观测序列，深入研究了目前海潮和固体潮模型的适定性及海潮负荷改正的有效性。顾及不同潮波振幅特征，提出了计算各台站平均观测残差和剩余残差矢量的“非等权均值法”，获得了经海潮负荷改正后，全球台站主波平均振幅因子与理论模型间的差异小于0.3%和仪器标定误差不超过0.5%的重要结论；用地表重力实测数据证实了Mathews等关于周日潮 K_1 和 O_1 波相位滞后是正值的理论计算结果[13]。

利用全球陆地水储量变化模型，基于格林函数方法，模拟了全球陆地水储量变化对重力场的影响；基于重力位理论，联合地表绝对重力测量和空间重力测量结果反演了区域的陆地水储量变化，并用井水位资料验证了反演结果的正确性[14]。从地下水渗透过程的物理机制出发，采用一维水动力学模拟，利用井水位和降雨数据模拟了武汉大地测量站附近的土壤含水率变化，在此基础上估计了地下水变化导致的重力效应[15]。

4 探测了与地球动力学相关的信号

4.1 自由核章动

地球自由核章动（FCN）是由于地幔与液态外核的瞬时旋转轴不一致而在椭球形核幔边界产生的一种自转简正模，它与液核的动力学扁率、核幔边界附近的黏滞系数、电导率、磁感应强度等密切相关[16]。

武汉大地测量站利用全球超导重力观测数据，确定了FCN的本征周期为430天左右，精密测定了FCN的共振参数[17]。估算了核幔边界的黏滞系数和电磁耦合参数，数值结果表明液核顶部的黏滞系数应该在 6.6×10^2—2.6×10^3 Pa·s之间，这与根据地球章动、液核自由章动及日长变化等的实际观测得到的黏滞系数结果非常吻合。结果还表明，地幔底部的电导率需要达到 2.6×10^6—1.0×10^7 S/m才能符合实际观测的FCN品质因子量级，耗散耦合对FCN本征周期的影响仅为1—2恒星日[18]。

利用模拟数据研究了周日潮波对FCN周期变化的敏感程度，根据 K_1 和 ψ_1 波的变化幅度发现FCN周期的变化幅度为2.5—4恒星日，与实际甚长基线干涉（VLBI）的观测结果非常符合，进一步验证了FCN的时变特征[19]。在此基础之上，研究了FCN周期的变化，成功提取到高信噪比的地球液态地核动力学信号并发现与核幔边界地磁急变的相关性（图1），从而

说明地磁急变可通过核幔边界电磁耦合影响液核与地幔相对运动[20]。

4.2 自由震荡

（1）提出了解算液核共振参数的三频谱线法。成功检测到2001年秘鲁里氏（Ms）8.2级地震激发的从 $_0S_0$ 到 $_0S_{48}$ 的基频震型，并且观测到了 $_0S_2$ 和 $_0S_3$ 的谱峰分裂现象。观测到秘鲁地震与阿拉斯加地震激发的 $_0S_2$ 振型周期的差异，该结果有可能反映了地球内核各向异性，发现自转方向和逆自转方向上 $_1S_2$ 振型谱线分裂不对称因子之间存在较大差异[21,22]（图2）。

（2）检测到2004年12月26日苏门答腊—安达曼特大地震激发的球型基频振型和2个径向振型和环型自由振荡的耦合现象，以及谱峰分裂现象[23]。通过自由震荡本征模和谱峰分裂参数，有效地约束了该特大地震的破裂机制[24]（图2）。

（3）检测到2—5 mHz的背景自由振荡信号，分析了其季节性和年际性变化特征，并结合海洋和大气数据对其激发机制进行了定性探讨[25]。提取了2—7 mHz频段范围的长周期面波和背景自由振荡信号，并提取到面波群速度频散曲线，证明了超导重力仪背景噪声观测资料具有反演上地幔结构的潜力[26]。

4.3 内核平动振荡

探测了内核平动振荡Slichter模三重谱线存在的可能性。结果表明，对于超导重力仪来说，目前的精度条件下有能力探测到Slichter模。发现了一组可能来自于内核平动震荡的三重谱线，其周期分别为5.310、4.995和4.344 h[27,28]。尽管如此，Slichter模是否存在仍然是一个争议的话题，需要进行更进一步的深入研究。因此，在深内部结构如何影响内核平动振荡的本征周期方面，也开展了相关的理论模拟工作，相关结果可为Slichter模的研究、探测及其对地球深内部结构的约束提供理论依据。

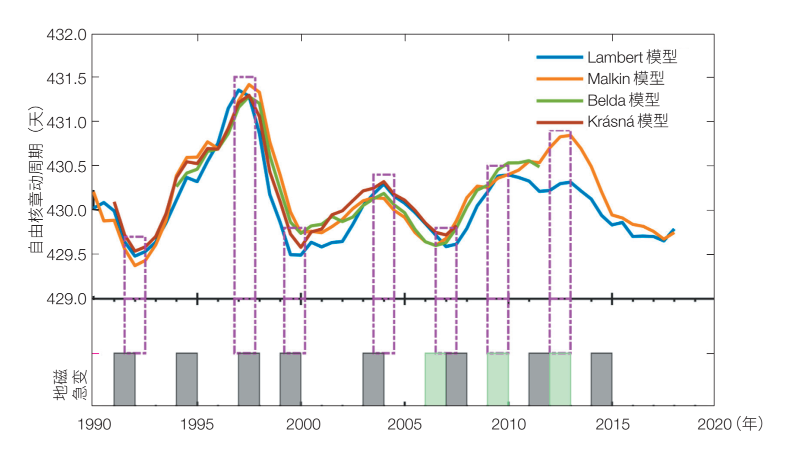


图1 地磁急变时间和FCN周期变化（实线）关系

Figure 1 Comparison of GMJ epochs with FCN period (solid lines)

灰色阴影：地磁急变时刻；浅绿色阴影：地磁场脉冲；紫色虚线：FCN周期变化的拐点

The gray and light-green shadows represent the GMJs and SA pulses, respectively; the violet dotted wireframe indicates the turning point of the FCN period

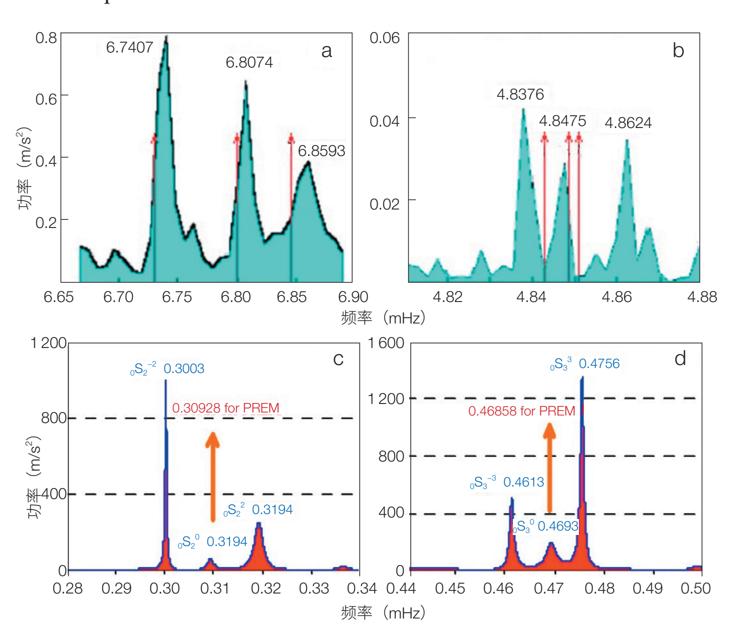


图2 由武汉超导重力仪检测到的地球简正模谱峰分裂

Figure 2 Spectrum splitting of Earth's normal modes detected by supercoducting gravimeter at Wuhan station

（a）和（b）为2002年秘鲁地震激发的 $_1S_2$ 和 $_{13}S_2$ 振型的异常谱峰分裂；（c）和（d）为2004年苏门答腊—安达曼特大地震激发的 $_0S_2$ 和 $_0S_3$ 振型的谱峰分裂，非常好地验证了初始参考地球模型（PREM）

(a) and (b) are, respectively, the anomalous splitting of $_1S_2$ and $_{13}S_2$ excited by the 2002 Peru earthquake; (c) and (d) are, respectively, the splitting of $_0S_2$ and $_0S_3$ excited by the 2004 Sumatra earthquake

5 促进了地球形变理论及数值模拟的发展

固体潮、地表质量负荷等效应在研究地球动力学现象过程中需要作为干扰信号加以扣除，这涉及到地球变形的理论模拟。武汉大地测量站研究人员发展了地球受不同力源作用下的理论变形模拟，开展了模拟方法的研究。改进了谱元法计算负荷和位错勒夫数[29,30]，提出了计算位错勒夫数的解析解方法①。发现改正后的残差中有明显与太阳加热相关的周日信号[28]。

特别是，最近发现青藏高原拉萨站的潮汐因子与云南丽江和湖北武汉的潮汐因子之间存在非常明显的差异[3]。该差异是否与青藏高原非常大的昼夜温差引起的热负荷有关？这需要进一步加以澄清。因此，我们顾及球形地球的分层结构，考虑地球的自引力效应、地球内部介质及热力学参数的各向异性，建立了球型分层地球在地表热负荷作用下的形变理论，计算了表征地球变形的热负荷勒夫数②。这些新的数值计算方法和理论将会促进超导重力观测研究，特别是观测信号的地球动力学解释。

6 结语

35 多年来，武汉大地测量站研究人员在利用超导重力仪观测技术研究相关科学问题方面，取得了一大批原创性的成果。例如：完善和发展了固体潮理论、海潮负荷计算理论，建立了地表热负荷理论，为相关的研究提供了理论指导；构建了全球固体潮实验模型和中国大陆精密重力潮汐改正模型，为基于地表的大地测量和地球物理的观测提供了必要的潮汐改正模型；对目前国际上的一些热点和前沿问题，如自由核章动、核幔耦合、地磁急变、内核平动振荡、地球简正模及谱峰分裂现象等，进行了深入的研究，得到了一些具有显示度的成果。上述成果先后获得国家自然科学基金重点项目、中国科学院知识创新工程项目、国家自然科学基金创新群体项目、国家重点研发计划、中国科学院战略性先导科技专项及其他项目的持续资助。获得了测绘科技进步奖一等奖、湖北省自然科学奖一、二等奖。在国际和国内重要期刊上发表了超过百篇高水平研究论文（含 *Science* 论文 1 篇）。

参考文献

1 徐建桥, 周江存, 罗少聪, 等. 武汉台重力长期变化特征研究. 科学通报, 2008, 53(5): 583-588.

2 许厚泽, 孙和平, 徐建桥, 等. 武汉国际重力潮汐基准研究. 中国科学D辑：地球科学, 2000, 30(5): 549-553.

3 Sun H P, Zhang H K, Xu J Q, et al. Influences of the Tibetan Plateau on tidal gravity detected by using SGs at Lhasa, Lijiang and Wuhan Stations in China. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2019, 30(1): 139-149.

4 Zhang M M, Xu J Q, Sun H P, et al. OSG-057 superconducting gravimeter noise levels in Lhasa (China). Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2016, 27(6): 807-817.

5 张苗苗. 超导重力仪台站背景噪声水平评估及信号提取. 测绘学报, 2017, 46(4): 535-535.

6 Xu J Q, Sun H P, Ducarme B. A global experimental model for gravity tides of the earth. Journal of Geodynamics, 2004, 38(3-5): 293-306.

7 Mathews P M. Love numbers and gravimetric factor for diurnal tides. Journal of the Geodetic Society of Japan, 46(4): 231-236.

8 Dehant V, Defraogme P, Wahr J M. Tides for a convective Earth. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B1): 1035-

① Liao B, Xu J, Zhou J, Sun H. Internal variable theory and spectral element method to post-seismic deformation in a spherical Earth. Geophysical Journal international, 2020, submitted.

② Zhou J C, Pan E, Bevis M. Deformation due to surface temperature variation on a spherically layered, transversely isotropic and self-gravitating Earth. Geophysical Journal international, 2021, revised.

1058.

9 周江存, 徐建桥, 孙和平. 中国大陆精密重力潮汐改正模型. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1474-1482.

10 孙和平. 大气重力格林函数. 科学通报, 1997, 42(15): 1640-1646.

11 Luo S C, Sun H P, Xu J Q. An investigation of the quasi 3-D atmospheric loading response on gravity—Implementation and evaluation. Journal of Geodynamics, 2009, 48(3-5): 366-370.

12 王继刚, 周江存. 沿海和岛屿重力海潮负荷改正模型——以马祖岛为例. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(8): 73-77.

13 孙和平, Ducarme B, 许厚泽, 等. 基于全球超导重力仪观测研究海潮和固体潮模型. 中国科学D辑: 地球科学, 2005, 35(7): 649-657.

14 Zhou J C, Sun H P, Xu J Q, et al. Estimation of local water storage change by space- and ground-based gravimetry. Journal of Applied Geophysics, 2016, 131: 23-28.

15 贺前钱, 罗少聪, 孙和平, 等. 武汉九峰站地下水变化对重力场观测的影响. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2765-2772.

16 孙和平, 崔小明, 徐建桥, 等. 超导重力技术在探讨核幔边界黏性特征中的初步应用. 地球物理学报, 2009, 52(3): 637-645.

17 Sun H P, Jentzsch G, Xu J Q, et al. Earth's free core nutation determined using C032 superconducting gravimeter at station Wuhan/China. Journal of Geodynamics, 2004, 38(3-5): 451-460.

18 Cui X M, Sun H P, Rosat S, et al. Investigation of the time variability of diurnal tides and resonant FCN period. Journal of Geodynamics, 2014, 79: 30-38.

19 Cui X M, Sun H P, Xu J Q, et al. Detection of free core nutation resonance variation in Earth tide from global superconducting gravimeter observations. Earth Planet and Space, 2018, 70(1): 199.

20 Cui X M, Sun H P, Xu J Q, et al. Relationship between free core nutation and geomagnetic jerks. Journal of Geodesy, 2020, 94(4): 1-13.

21 雷湘鄂, 许厚泽. 解算液核自由章动常数的三线频谱线法. 中国科学D辑: 地球科学, 2001, 31(9): 727-734.

22 雷湘鄂, 许厚泽, 孙和平. 利用超导重力观测资料检测地球自由振荡, 科学通报, 2002, 47(18): 1432-1436.

23 雷湘鄂, 孙和平, 许厚泽, 等. 苏门达腊大地震激发的地球自由振荡及其谱线分裂的检测与讨论. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(4): 504-511.

24 Park J, Song T, Tromp J, et al. Earth's free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake. Science, 2005, 308: 1139-1144.

25 Sun H P, Zhang M M, Xu J Q, et al. Reanalysis of background free oscillations using recent SG data. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2019, 30(6): 757-763.

26 Li H, Xu J Q, Chen X D, et al. Extracting Long-period surface waves and free oscillations using ambient noise recorded by global distributed superconducting gravimeters. Seismological Research Letters, 2020, 91(4): 2234-2246.

27 徐建桥, 孙和平, 周江存. 内核平动三重谱线的实验探测. 科学通报, 2009, 54(22): 3483-3490.

28 Sun H P, Xu J Q, Ducarme B. Detection of the translational oscillation of the earth's solid inner core based on the international SG observations. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(11): 1165-1176.

29 廖彬彬, 徐建桥, 孙和平, 等. 利用谱元法计算SNREI地球的表面负荷变形. 地球物理学报, 2019, 62(7): 2382-2393.

30 Zhou J, Pan E, Bevis M. 2019. A point dislocation in a layered, transversely isotropic and self-gravitating Earth. Part I: Analytical dislocation Love numbers. Geophysical Journal International, 2019, 217(3): 1681-1705.

High-precision Superconducting Gravimetric Observations and Investigations Provide National Surveying and Mapping and Earth's Dynamics with Theoretical Fundamentals

SUN Heping[1,2] ZHOU Jiangcun[1] XU Jianqiao[1] CHEN Xiaodong[1] LEI Xiang'e[1] CUI Xiaoming[1] NIU Xiaowei[3]

(1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Wuhan National Geodetic Observatory, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract Since 1985, about 35-year high-precision gravity data have been being well accumulated and worldwide cooperation was effectively carried out. The unique international tidal gravity reference in Asia was established. The background noise model for low frequency in Chinese continent was constructed. A global experimental model and an accurate correction model in Chinese continent for gravity tides of the Earth were both constructed. The theoretical simulation of the effect of surface mass loading on gravity was improved. The signals related to the nearly diurnal resonance, Earth's free oscillation and translational wobble of the Earth's inner core were detected to investigate the physical parameters of the Earth's deep interior. A theory which couples temperature into elastic deformation of a layered and self-gravitating spherical Earth was proposed. The above mentioned achievements would contribute to national precise surveying and mapping, global large-scale geodynamics and space techniques as roles of new instructions and/or references.

Keywords Earth's tides, superconducting gravimeter, geodynamics, mass transfer, theory on deformation



孙和平 中国科学院院士。中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员，中国科学院大学教授。1995年毕业于比利时鲁汶大学地球物理专业，获博士学位。长期从事地球动力学与微小形变的高精度重力信号检测、理论模拟和力学机制解释等工作。国际大地测量协会（IAG）会士，国际IAG固体潮与地球动力学委员会委员。曾任中国科学院测量与地球物理研究所所长，中国测绘学会与湖北省测绘学会副理事长。国家杰出青年科学基金获得者，国家自然科学基金委员会创新群体项目与重点项目负责人。*Journal of Geodesy*、*Earth and Planetary Physics*，以及《地球物理学报》《测绘学报》和《地震学报》等杂志编委。获2007年全国测绘科技进步奖一等奖和2012年湖北省自然科学奖一等奖。

E-mail: heping@whigg.ac.cn

SUN HePing Research professor of Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is also a professor of University of CAS and an academician of CAS. He received Ph.D. degree in geophysics in Catholic University of Leuven in 1995. He has been focusing on the geodynamics and theory, simulation, and detection of the Earth's tiny deformation and its mechanism by gravimetric technique. He was funded by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of National Natural Science Foundation of China, and as principal investigator of the Science Fund for Creative Research

Groups of the National Natural Science Foundation of China. He is a fellow of International Association of Geodesy (IAG) and a committee member of the International Geodynamics and Earth Tide Services (IGETS), and the vice president of Chinese Society for Geodesy Photogrammetry and Cartography, and its Hubei branch as well. He was the head of the Institute of Geodesy and Geophysics, CAS. He is now the board member of many domestic and international journals such as *Journal of Geodesy*, *Earth and Planetary Phyiscs*, *Chinese Journal of Geophysics*, *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, *Acta Seismologica Sinica*. He won the first-class Prize of Technical Advancement of Chinese Society for Geodesy Photogrammetry and Cartography in 2007 and the first-class Prize of Natural Science of Hubei Province in 2012. E-mail: heping@whigg.ac.cn

■责任编辑：张帆